

Физическое моделирование режимов движения ледников

© 2016 г. В.П. Елифанов

Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
evp@ipmnet.ru**Physical simulation of glacier motion modes**

V.P. Epifanov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
evp@ipmnet.ru

Received February 24, 2016

Accepted April 7, 2016

Keywords: *acoustic emission, friction, glacier, physical modeling, rheology of ice.*

Modes of «dry friction» at glacier-bedrock interface (ice sliding and flow) were simulated under uniform compression with different combinations of mechanical and thermodynamic factors. Effect of ice structure in the intermediate layer was considered in terms of strength of ice adhesion to complex-shaped substrate for typical cases: at frictional contact of ice frozen to the walls of the cylindrical matrix; when ice was pressing-through a confuser (with contraction ratio = 30); extruding the ice in a plastic state through a pipe. For these tests, a collapsible matrix was used. It consists of three sections: the feed cylinder, the convergent channel (confuser) and the forming pipe. Changes of ice during severe plastic deformation were monitored by acoustic emission in the range from 10 Hz to 25 kHz. Relationship between the size of moving structural elements, their natural resonant frequency, density and acoustic capacitance was applied. A theoretical model was verified. Correlation of amplitude-frequency spectra of acoustic emission at the frictional contact with the acoustic spectrum of natural oscillations of the glaciers from distant sources was confirmed. The results can be applied to remote sensing studies of ice movement modes at the glacier bedrock.

Поступила 24 февраля 2016 г.

Принята к печати 7 апреля 2016 г.

Ключевые слова: *акустическая эмиссия, ледник, реология, трение, физическое моделирование.*

Воспроизведены основные режимы движения ледников по сухому ложу – скольжение и течение, включая образование промежуточного слоя. Выявлен эффект формирования спиралевидной структуры льда в условиях высокого гидростатического давления. Теоретическая модель отражает суть физических процессов интенсивной пластической деформации в пресноводном льду, к которой относится и рекристаллизация. Определены структура, физико-механические, прочностные и акустические характеристики льда в промежуточном слое, рассмотрено также их влияние на режим скольжения. Разработанный акустико-механический метод может быть применён для дистанционного изучения режимов движения ледников по ложу.

Введение

Наблюдениями установлено, что большая часть продольных смещений ледника происходит в придонном слое – промежуточном между ложем ледника и основной массой льда [1]. Предполагается, что причина больших деформаций в этом слое обусловлена его структурой, которая имеет совершенно иные, чем остальная масса льда, физико-механические и прочностные свойства [2]. Ввиду затруднённого доступа к ложу ледников свойства льда в промежуточном слое изучены недостаточно, хотя именно изучение структуры льда в леднике – необходимое условие понимания механизмов его движения. В первом приближении проблемы формирования и изучения свойств льда в промежуточном слое могут быть, по-видимому, сведены к полу-

чению объёмных образцов пресноводного льда в условиях, близких к тем, которые соответствуют термодинамическим условиям в придонных слоях ледников. Техника интенсивной пластической деформации позволяет получать структуры материалов с высокой текучестью [3, 4]. Подобным образом, при сдвиге пресноводного льда по подложке в условиях всестороннего сжатия, можно моделировать режимы движения ледника по ложу.

Предварительные эксперименты показали, что при сдвиге льда по подложке сложной формы образуется мелкокристаллическая структура с повышенной текучестью [5, 6]. Продолжая эти исследования, мы ставим своими целями количественное определение деформационных изменений структуры льда непосредственно при сдвиге в условиях высокого

гидростатического давления с помощью метода акустической эмиссии [7, 8], а также оценку влияния структуры льда в промежуточном слое на адгезионную прочность соединения льда с подложкой. Для упрощения задачи рассматривается случай сухого трения.

Методика экспериментальных исследований

Движение ледника по ложу моделировали с помощью разборной матрицы, которая состояла из трёх секций. Первая, загрузочная секция выполнена в виде канала диаметром $D = 57$ мм; вторая секция – в виде сужающегося канала (конфузора) с углом при вершине конуса $2\gamma = 60^\circ$; третья – это выводной патрубок диаметром $d = 10$ мм (рис. 1). Диаметр пресс-штемпеля 57 мм. Толщина стенок (сталь марки 45) обеспечивает достаточную жёсткость матрицы, а её разборная конструкция даёт возможность исследовать разные режимы движения льда. Поверхность соприкосновения пресс-штемпеля со льдом задана в форме эллипсоида, которая гарантирует минимальные сдвиговые напряжения и равномерное распределение нормальных напряжений [9] на его контакте со льдом. Выбранная схема моделирования движения льда в ледниках позволяет рассматривать общие случаи контактного взаимодействия ледникового льда с его ложем (не только плоским и гладким, но и шероховатым), а также с бортами ледников, особенно в местах их сужения и препятствий разной геометрической

формы на ложе ледника. Пресс-штемпель имитирует гравитационное поле. Цилиндрическая часть матрицы в первом приближении моделирует гладкое ложе холодных ледников. Конфузор моделирует (также в первом приближении) сужающееся углубление на ложе ледника с достаточно высокими берегами (сужающиеся борозды на ложе ледников, ориентированные в направлении его движения), а также борта ледников и крупные препятствия на их ложе. Патрубок имитирует выход льда из углубления между бороздами на ложе ледников.

Сохраняя условия замораживания дистиллированной воды в матрице постоянными, получали исходную структуру льда со средним диаметром зёрен 3 мм. После термостатирования матрицу со льдом помещали между плитами пресса типа П-50 с номинальной силой 0,5 МН. Осевая сила передавалась на лёд через шаровую опору и пресс-штемпель. Скорость перемещения траверсы – $3,2 \cdot 10^{-4}$ м/с. В процессе нагружения измеряли осевую силу, смещение пресс-штемпеля, регистрировали спектры сигналов акустической эмиссии [5, 8, 10], температуру матрицы (льда) и время. Пьезоэлектрические датчики типа KD91 и KB10 крепили к стенке матрицы. Схема и характеристики измерительной акустической линии приведены в работе [6].

Пресс в 50 т позволяет имитировать давление на ложе ледников, а также задавать скорость приложения осевой силы. Термостатирующие устройства дают возможность поддерживать температурные условия, существующие на ложе ледников. С помощью современной акустиче-

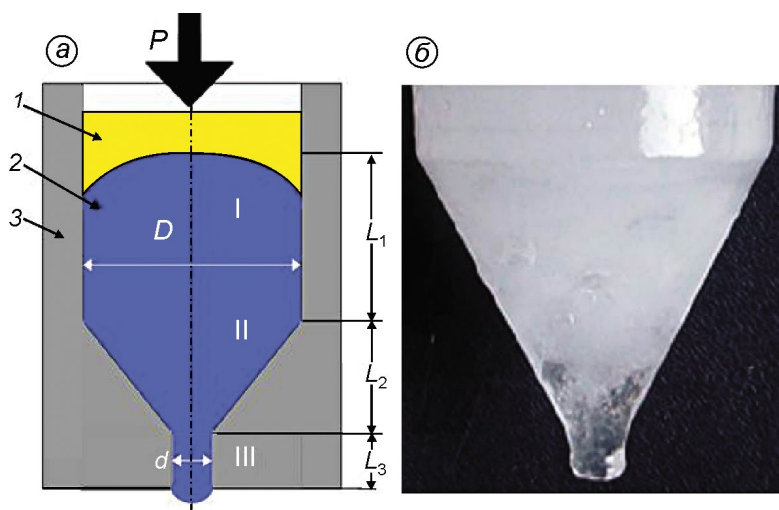


Рис. 1. Схема устройства матрицы (а) и фрагмент образца льда, подвергнутого интенсивной пластической деформации (б): I – пресс-штемпель; 2 – лёд; 3 – матрица; I – цилиндрическая секция; II – конфузор; III – формирующий патрубок; L_1 , L_2 , L_3 – длины секций матрицы

Fig. 1. Structure diagram of the matrix (а) and fragment of an ice sample subjected to severe plastic deformation (б):

I – compression ram; 2 – ice; 3 – the matrix; I – cylindrical section; II – confusor; III – the forming tube; L_1 , L_2 , L_3 – the length of the matrix sections

ской измерительной линии можно вести количественные измерения акустических характеристик льда, например частоты заполнения и амплитуды сигналов акустической эмиссии и параметров акустических спектров в процессе нагружения и замораживания воды. Структуру льда исследовали с помощью поляризационной микроскопии, а полученные результаты сравнивали с данными акустических измерений.

Результаты измерений

Для решения поставленной задачи выполнены три серии экспериментов.

В первой серии экспериментов моделировали локальную подвижку ледника. Примороженный к подложке лёд, структура которого известна (рис. 2, *з*), под действием осевой силы P преодолевает сцепление с подложкой и начинал скользить по ней. На деформационных кривых (см. рис. 2, *а, б*) «сила–время» $P(\tau)$ и «смещение–время» $\varepsilon(\tau)$, полученных при температуре

$-15,7\text{ }^\circ\text{C}$, выделены отрезки, соответствующие стадиям предварительного сдвига 1, срыва 2 и скольжения льда по подложке 3. По максимуму на кривой $P(\tau)$ определены адгезионная прочность равная 2,26 МПа и коэффициент трения сцепления $\mu_0 = 0,5$. Рассчитанные значения не противоречат значениям адгезионной прочности соединения льда с металлической подложкой [11] и трения покоя [12]. Переход от трения покоя (стадия 1, см. рис. 2, *а*) к трению скольжения (стадия 3, см. рис. 2, *а*), по-видимому, можно рассматривать как «хрупкое» разрушение адгезионного контакта льда с подложкой.

Скольжение льда по подложке (нисходящий участок кривой «сила–время», см. рис. 2, *а*) сопровождается уменьшением осевой силы. Фактически на стадии 3 наблюдается переход от граничного трения к смешанному. Наиболее вероятная причина этого – изначальное присутствие на поверхности льда жидкоподобного (liquid like layer) слоя, толщина которого изменяется при трении в результате выделения тепла. Увеличение толщины плёнки жидкостной

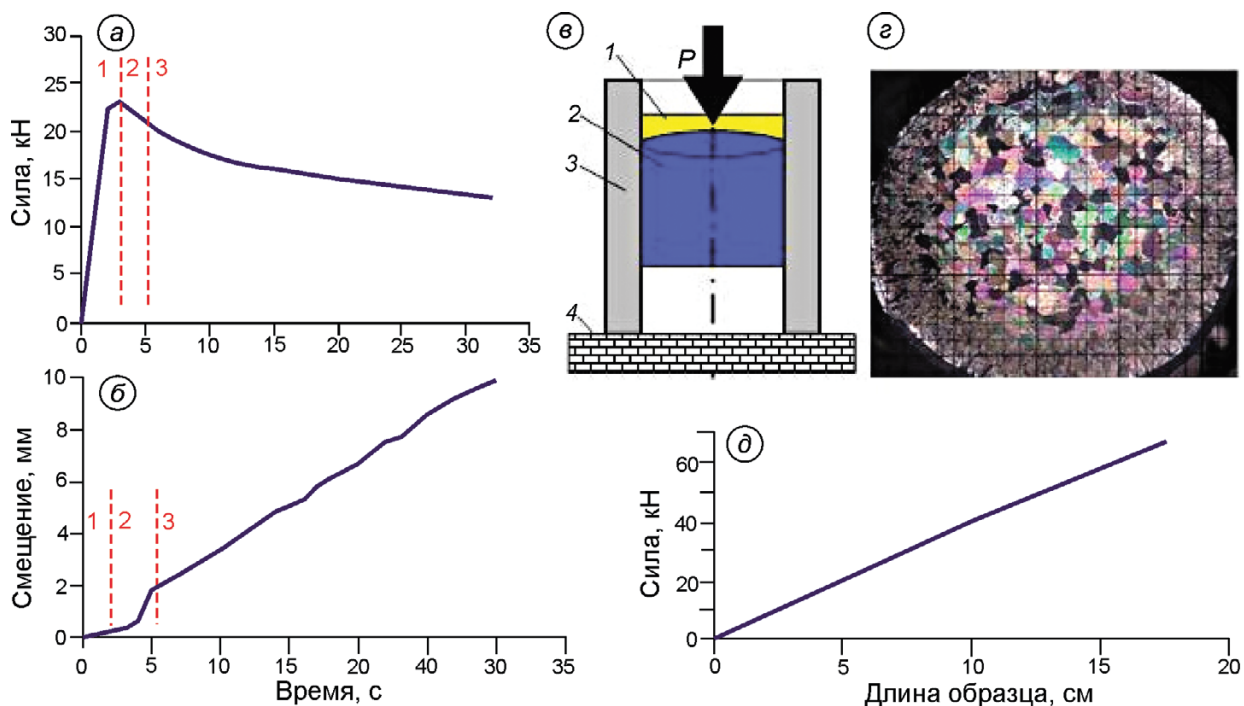


Рис. 2. Стадии движения льда по подложке в цилиндрической секции матрицы: зависимости осевой силы (*а*) и осадки пресс-штемпеля (*б*) от времени; схема нагружения (*в*): 1–3 – см. рис. 1; 4 – опора; зависимость осевой силы от длины образца (*д*); *з* – структура льда, масштаб сетки 2 мм. Пояснения в тексте

Fig. 2. Stages of ice movement on a substrate in the cylindrical section of the matrix: relationships on the axial force (*a*) and displacement of compression ram (*b*) versus time; loading scheme (*v*): 1–3 – see Fig. 1; 4 – support; relationship of the axial force with sample length (*d*); *z* – ice structure, grid spacing is 2 mm. Explanations are in the text

смазки (при её малых значениях) обуславливает уменьшение фактической площади «сухого» контакта льда с подложкой [13]. При испытаниях образцов льда разной длины (от 5 до 17,5 см) в цилиндрической части матрицы получена (см. рис. 2, д) линейная зависимость осевой силы от длины образца (4 кН/см). Этот результат подтвердил отсутствие побочных факторов, влияющих на трение при следующих условиях эксперимента: средний диаметр зёрен льда равен 3 мм; диаметр образца – 57 мм; температура –15,7 °С.

Полагая, что максимальная величина радиального напряжения σ_{p1} у стенки матрицы не может превышать напряжений текучести σ_{S1} , т.е. $|\sigma_{p1}| \leq \sigma_{S1}$, в первом приближении можно записать, что

$$\sigma_1 = P_1/F_1 = \sigma_{S1}4\mu L_1/D, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения при пластическом деформировании; L_1 – длина образца льда; D – диаметр цилиндрической части матрицы.

С учётом экспериментальных данных (для времени $\tau = 30$ с) находим $\mu = 0,18$ ($P = 13$ кН). Значение рассчитанного коэффициента трения льда при пластическом деформировании не выходит за рамки вариаций этой величины, полученной другими исследователями при близких скоростях скольжения [12]. Таким образом, первая серия экспериментов может рассматриваться как моделирование локальной подвижки ледников на «гладком» ложе (solid-solid contact). Лёд представляет собой упрочняющийся вязкоупругий материал с низким значением предела текучести, поэтому сдвиговые напряжения должны были передаваться в лёд и вызывать деформационные изменения структуры в слое конечной толщины. Однако присутствие жидкоподобного слоя на поверхности льда препятствует распространению сдвиговых напряжений внутрь льда. Вся деформация оказывается локализованной в тонком слое/плёнке, и основная масса (bulk) льда «проталкивается» пресс-штемпелем как упругое тело. О формировании слоя малой толщины при сдвиге и о влиянии его на прочность соединения льда с подложкой можно судить только по уменьшению эффективного упругого модуля. По данным экспериментов, его значение уменьшается от 3,5 ГПа (восходящая) до 1 МПа (нисходящая ветвь кривой, см. рис. 2, а).

Вторая серия экспериментов отличается от первой тем, что к цилиндрической секции (с гладкими стенками) был присоединён конфузор с углом $2\gamma = 60^\circ$ при вершине (рис. 3, б), который заканчивался острым срезом без формирующего пояска. Лёд в матрице (см. рис. 3, а) формировали послойным замораживанием дистиллированной воды. Продавливая лёд через конфузор, имитировали движение ледника по твёрдому ложу в условиях интенсивной пластической деформации. Такие условия возникают при наличии препятствий на ложе ледника, которые создают значительный градиент напряжений в прилегающем слое льда и на порядок увеличивают напряжение сдвига [14]. Именно в условиях интенсивной деформации формируется мелкокристаллическая структура льда с повышенной текучестью. За меру пластической деформации принята величина $\epsilon = \ln(D^2/d^2)$, где D и d – соответственно диаметры льда в цилиндрической части матрицы и в струе. Для условий эксперимента пластическая деформация $\epsilon = 3,48$. Как видно из рис. 3, з, присоединение конфузора вызвало многократное увеличение максимальной осевой силы на пресс-штемпеле (с 23 до 120 кН) и изменение структуры льда, находящегося в конфузоре (см. рис. 3, в).

Представим осевое давление P для секций (L_1 и L_2) как сумму давлений в цилиндрической P_1 и конической P_2 секциях матрицы [14]:

$$P = P_1 + P_2 = \sigma_{S2} \left(\frac{\mu_2 + 0,5}{2\sin\gamma} + \frac{2}{1 + \cos\gamma} \right) \ln \frac{D^2}{d^2} + \sigma_1, \quad (2)$$

где σ_{S2} и μ_2 – соответственно предел текучести льда и коэффициент пластического трения в конфузоре; d – диаметр отверстия матричной воронки и патрубка.

Множитель в правой части уравнения (2)

$$\sigma_{S2} \left(\frac{\mu_2 + 0,5}{2\sin\gamma} \right) \ln \frac{D^2}{d^2}$$

учитывает трение в конфузоре, а множитель

$$\sigma_{S2} \left(\frac{2}{1 + \cos\gamma} \right) \ln \frac{D^2}{d^2}$$

определяет напряжения, необходимые для выдавливания льда. Подставляем значения обозначенных величин (данные прямых измерений) и получаем значения напряжений, затрачиваемых на трение в конфузоре – 5,2 МПа, на выдавлива-

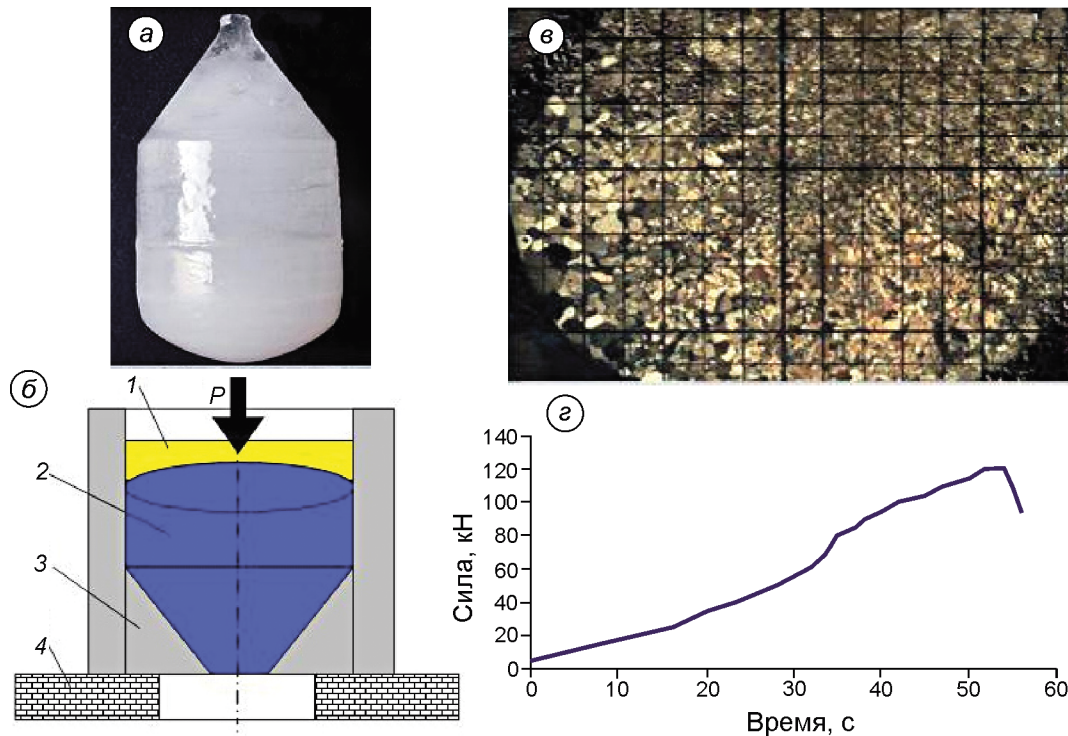


Рис. 3. Продавливание льда через конфузор:

a – образец льда, подвергнутый интенсивной пластической деформации; b – схема нагружения: 1, 2, 4 – см. рис. 1; 3 – конфузор; c – структура льда после разгрузки, масштаб сетки 2 мм; d – зависимость осевой силы P от времени

Fig. 3. Ice punching through confuser:

a – ice sample subjected to severe plastic deformation; b – loading scheme: 1, 2, 4 – see Fig. 1; 3 – matrix; c – ice structure after unloading, grid spacing is 2 mm; d – relation of the axial force P with time

ние льда из конфузора – 8,2 МПа и на трение в цилиндрической части матрицы – 9,7 МПа.

Сумма расчётных напряжений для выбранных секций матрицы (L_1 и L_2) равна около 23 МПа. Если принять, что коэффициент трения в трубке такой, как и в загрузочной секции ($\mu = 0,18$), то напряжение для третьей секции должно быть равно 7,5 МПа, а сумма расчётных напряжений для полной сборки (L_1, L_2, L_3) составит 30,5 МПа. Фактически напряжения на рабочей поверхности пресс-штемпеля составляют 40 МПа. Вероятно, что это расхождение ($\Delta\sigma = 9,5$ МПа) обусловлено затратами энергии на упрочнение льда, которое происходит в процессе пластических деформаций ($\Delta\varepsilon = 3,48$). Рост диссипативных потерь в конфузоре обусловлен увеличением затраты энергии на формирование структуры льда с меньшим размером кристаллов. По этим затратам можно определить коэффициент упрочнения (модуль нормальной пластичности) $\lambda = d\sigma/d\varepsilon$ (где $d\sigma \cong \Delta\sigma = 9,5$ МПа – напряжение, а $d\varepsilon \cong \Delta\varepsilon = 3,48$ – пластическая деформация). Соот-

ветственно коэффициент упрочнения λ будет равен 2,7 МПа. Это значение более чем на три порядка меньше модуля Юнга (9,3 ГПа) и согласуется с оценками, полученными по кривым упрочнения.

В третьей серии экспериментов к конфузору присоединен патрубок. Сформированный в конфузоре мелкокристаллический лёд выдавливается через этот патрубок из матрицы. Согласно уравнению (1), рассчитано эффективное значение коэффициента трения льда в трубке $\mu = 0,4$. Оно не противоречит значениям, полученным в работе [15] для скоростей скольжения 10^{-5} – 10^{-6} м/с (≥ 30 м/год). Лёд в матрице находится в пластическом состоянии, которое обусловлено всесторонним сжатием и высоким давлением. Поскольку в придонных слоях ледников, например Антарктиды, лёд находится именно в условиях высокого гидростатического сжатия, то метод составной матрицы может быть принят за основу при дальнейших исследованиях коэффициента трения и адгезионной прочности соединения с подстилающей горной породой.

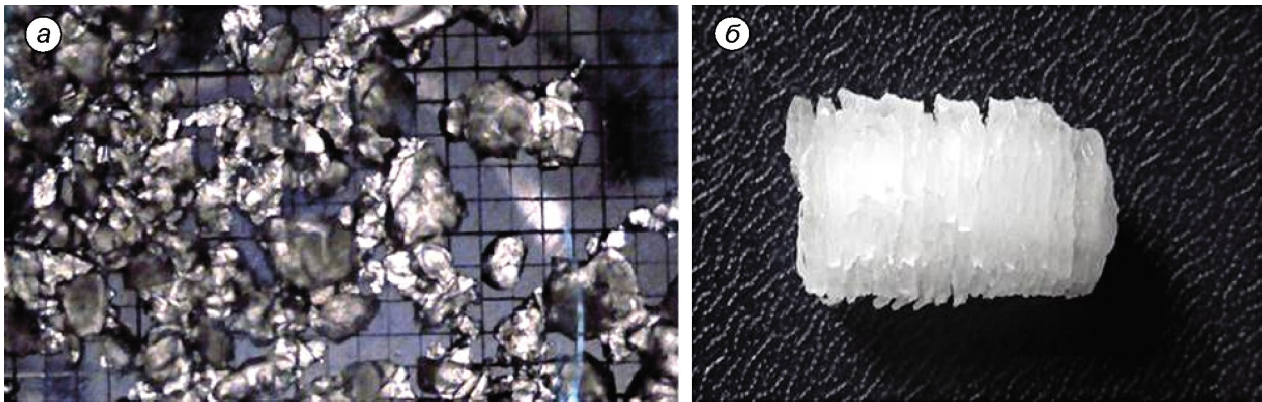


Рис. 4. Фрагменты ледяной струи, состоящей из текстурированного льда, сформированного в конической части матрицы без пояса в режиме неустойчивого выдавливания (а) и скольжения (б)

Fig. 4. Fragments of ice jet consisting of textured ice formed in the conical part of the matrix without the girdle in the unstable mode of extrusion (a) and sliding (b)

Отметим, что ледяные зёрна, выдавленные из среза конической части матрицы (рис. 4), имеют округлую форму. Это показывает, что, кроме механизмов пластической деформации, включая сдвиги по плоскостям скольжения внутри кристаллов, их дробление, межкристаллитные сдвиги и рекристаллизацию, в этой части матрицы происходит также фрикционный нагрев. Изменение температуры плавления льда при давлении можно оценить из известного соотношения $\Delta T = \sigma_{S2} / (\rho C_p)$. Подставляя

значения плотности $\rho = 920 \text{ кг/м}^3$ и теплоёмкости $C_p = 2 \text{ Дж/(г}\cdot\text{К)}$ в эту формулу, получаем для давления $\sim 10 \text{ МПа}$ изменение температуры $\Delta T \approx 5 \div 6 \text{ }^\circ\text{C}$. В цилиндрической части матрицы такое повышение температуры не может вызвать появление очага плавления при начальной температуре льда $-15,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако в случае полной сборки максимальные силы, а следовательно, и напряжения существенно выше (рис. 5), и, как показывают оценки, оплавление кристаллов льда вполне возможно.

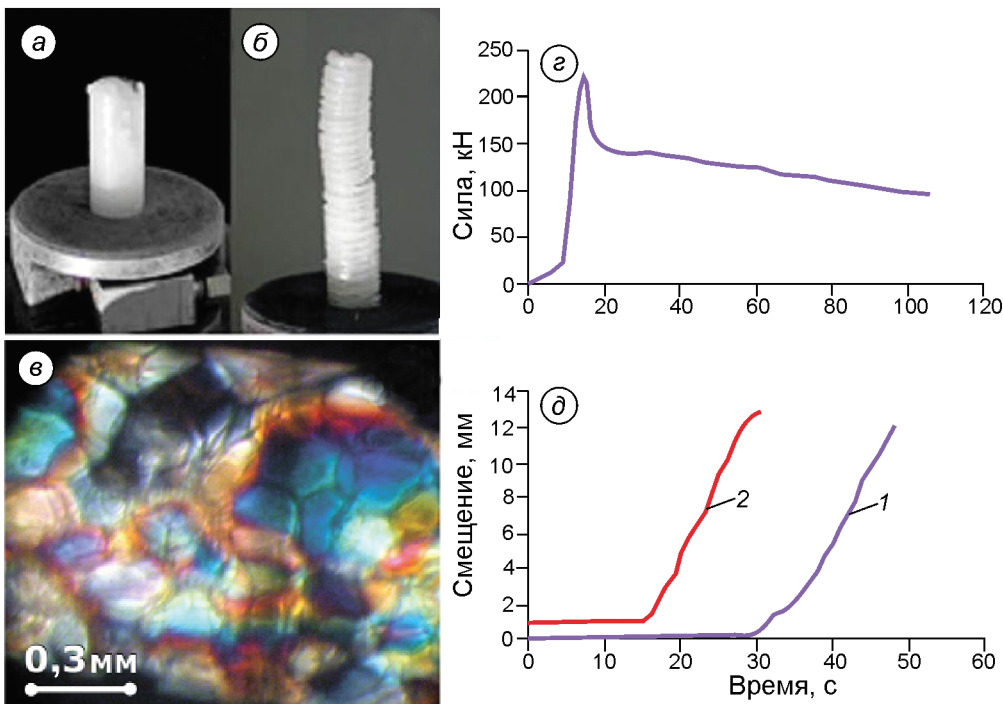


Рис. 5. Продавливание рекристаллизованного льда через патрубок.

Для полной сборки матрицы: а, б – соответственно гладкая и геликоидальная струя льда; в – субмикроструктура льда в струе; г – зависимость силы от времени; д – зависимости смещения от времени: 1 – при повторной нагрузке; 2 – при первичной нагрузке

Fig. 5. Punching of recrystallized ice through the pipe.

For the complete matrix assembly: а, б – are, respectively, smooth and helical ice jets; в – submicrostructure of ice jet; г – force versus time; д – displacement versus time: 1 – at repeated loading and; 2 – at primary loading

Причинами винтовых (спиралевидных) течений в конфузоре могут быть структура его стенок, механические свойства, неоднородность деформаций (бифуркации вращения) и анизотропия стенок и льда. В конфузоре большое сечение матрицы плавно переходит в меньшее, при этом увеличиваются скорость течения льда и динамическое давление в направлении движения потока, статическое же давление уменьшается. Эффект вихреобразования в вязких жидкостях известен давно [16]. Применительно ко льду эффект вязкого трёхмерного течения льда требует дальнейшего исследования. Очевидно, что спиралевидные вторичные структуры льда формируются в конфузоре и присутствуют в гладкой струе (см. рис. 5, а), а при превышении коэффициента внешнего трения над коэффициентом внутреннего трения можно наблюдать «резбовую нарезку» (подобную метрической М10 с шагом около 2 мм) (см. рис. 5, б).

В результате интенсивной деформации получены макрообразцы мелкокристаллического льда. Применённая схема деформирования с обжатием $D^2/d^2 = 30$ позволяет получать стержни льда диаметром 10 мм. Лёд в струе имеет диаметр зёрен 0,3 мм, среднюю плотность 883 кг/м³ при -17 °С и течёт со скоростью около 10 км/год. Скорость распространения продольной волны почти на 27 м/с больше, чем во льду, находящемся в изложнице (V_p равна 3862 и 3889 ± 6 м/с соответственно). Увеличение модуля вызвано изменением структуры льда, что не противоречит известным экспериментальным фактам.

Ранее при ударе жёсткого шарового индентора и квазистатическом внедрении цилиндрического штампа в ледяную пластину также наблюдали образование промежуточного слоя с мелкокристаллической структурой льда [6], однако толщина этого слоя не превышала 2 мм. Непременное условие формирования такого слоя – высокое гидростатическое давление, при котором возможен сдвиг не только по базисной плоскости кристаллической решетки льда, но и по другим её плоскостям. Этот фактор, по-видимому, играет решающую роль в гомогенизации структуры при переходе льда от одного к другому термодинамическому состоянию при обжатии в изложнице.

Разработанный акустико-механический метод позволяет исследовать механизмы пере-

хода пресноводного льда в пластическое и сверхпластическое состояние, а также моделировать взаимодействие ледникового льда с препятствием на его ложе. Поскольку свойства льда в промежуточном слое существенно отличаются от его свойств в объёме, то всякого рода усреднения реологических характеристик льда при расчётах движения ледника, равно как и использование стандартных значений параметров «реологического закона» Глена в теориях скольжения, могут оказаться недостаточно оправданными.

Интенсивная деформация льда сопровождается излучением акустического спектра сигналов акустической эмиссии (рис. 6). Источники излучения – элементы структуры льда в момент их разрушения. Наблюдаемые в акустическом спектре максимумы отражают определённые уровни разрушения структуры. Это позволяет наблюдать кинетику их разрушения и исследовать влияние различных факторов (условий нагружения и самой структуры) на адгезионную прочность льда. Для анализа использована связь между размером подвижных элементов структуры (радиус R), их резонансной частотой f_0 , плотностью льда ρ и жёсткостью связей k [8]:

$$R = \sqrt[3]{\frac{k}{16\pi^3 f_0^2 \rho}}. \quad (3)$$

Согласно используемой в данном случае цепочечной модели [6, 17], подвижные элементы структуры льда рассматриваются в виде шаров, соединённых упругими связями, имеющими жёсткость k . Значения жёсткости на растяжение и изгиб для связей О–Н–О и Н–О–Н при 273 К равны соответственно $k^* = 15,5$ Н/м и $k^{**} = 56$ Н/м [18]. Подставляя в уравнение (3) соответствующие величины ρ , k , и f , получаем зависимости собственной частоты осцилляторов от их размера R как функцию частоты излучения сигналов акустической эмиссии (рис. 7).

Необходимая определённость в оценке деформационных изменений структуры по изменению акустических свойств льда в рассматриваемом случае достигается независимым определением размера зерна, его массы и известной жёсткостью связей в кристаллической решётке льда. При увеличении осевой нагрузки (см. рис. 5) создаются условия для полигонизации и дробления кристаллов (режеляционная переكري-

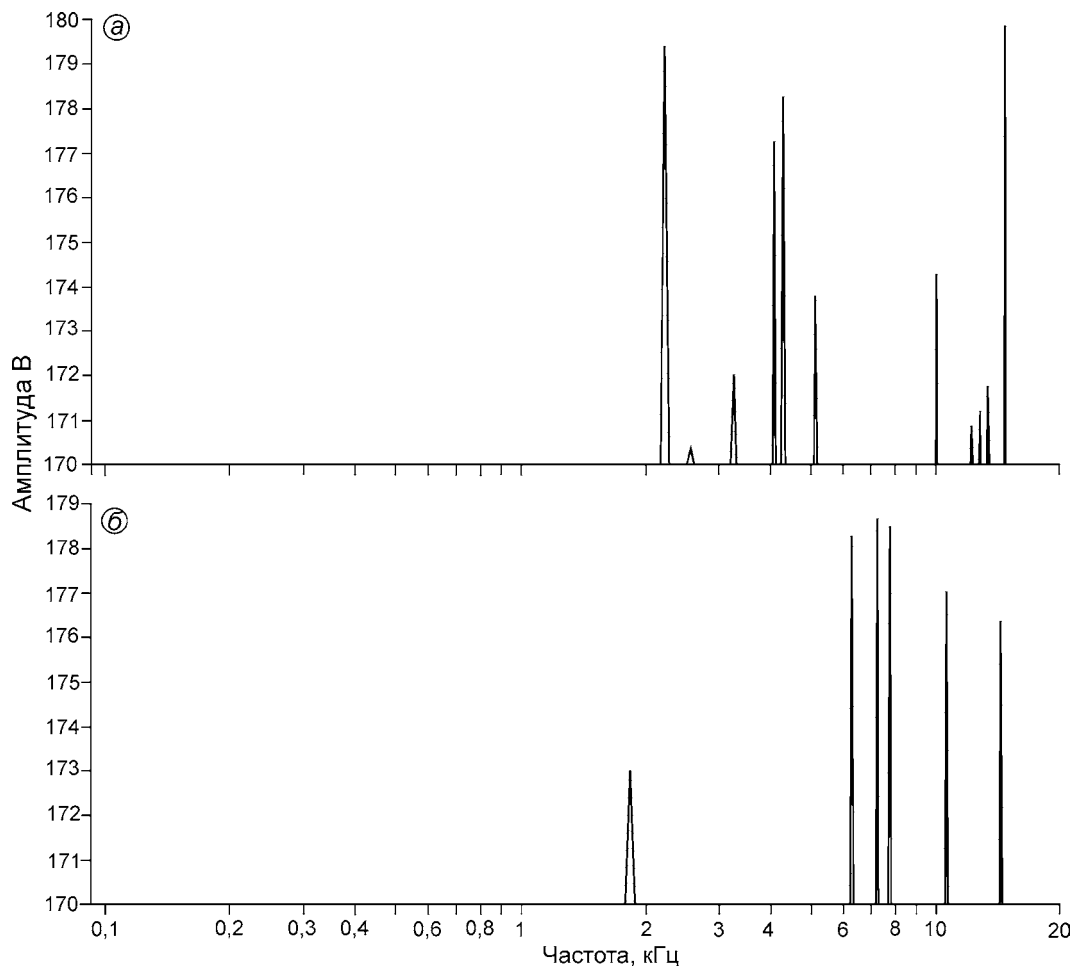


Рис. 6. Акустические спектры сигналов акустической эмиссии при выдавливании льда для разных моментов времени (а, б) наблюдения

Fig. 6. The acoustic spectra of acoustic emission signals during ice extrusion for different times (a, b) of observation

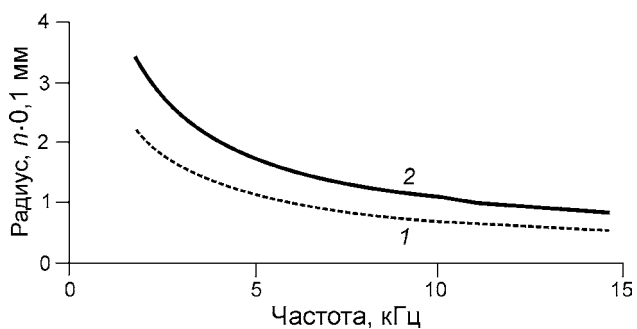


Рис. 7. Зависимости радиуса осцилляторов от частоты излучения сигналов акустической эмиссии для жёсткости связи $k = 15,5$ Н/м (1) и $k = 56$ Н/м (2) в процессе изменения структуры льда в зоне конической части матрицы

Fig. 7. Relationship of oscillator radius with acoustic emission frequency with link stiffness $k = 15.5$ N/m (1) and $k = 56$ N/m (2) during ice structure changes in the conical part of the matrix

сталлизация). Тенденция к достижению «равновесного» размера зерна отражается на форме «акустических» зависимостей $R(f)$. Выполаживание экспериментальных кривых (см. рис. 7) обусловлено переходом от исходной структуры льда (см. рис. 2) с диаметром зёрен 3 мм к субмелкокристаллической структуре, которая состоит из тонкоперетёртого льда диаметром около 0,3 мм и леяного цемента (милонит).

Полученная количественная информация о кинетике изменения структуры льда, а также наблюдаемая в условиях эксперимента зависимость формы струи от температурно-временного фактора соответствуют поставленной задаче физического моделирования режимов движения льда в ледниках, включая оценку влияния структуры льда в промежуточном слое на режим движения ледников.

Обсуждение результатов

Экспериментально воспроизведены два предельных режима движения ледникового льда по ложу: скольжение и течение, реализуемые путём поступательного движения пресс-штемпеля в цилиндрической части матрицы и продавливания льда через конфузур и формирующий патрубок. Режимы движения льда могут быть представлены уравнением

$$\frac{d\sigma}{dt} = G \frac{d\varepsilon}{dt} - G \frac{\sigma}{\eta} = G \left(\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{\eta} \right), \quad (4)$$

где $d\varepsilon/dt$ – скорость деформации; η – вязкость; σ/η – скорость ползучести льда; G – модуль сдвига.

Из уравнения (4) следует, что механизм деформации определяется соотношением скоростей деформации и ползучести льда. Если $d\varepsilon/dt < \sigma/\eta$, то во льду реализуется механизм ползучести; если $d\varepsilon/dt > \sigma/\eta$, то напряжения накапливаются, нарушается сплошность льда и формируются кинематические связи, приводящие к блоковому скольжению льда (см. рис. 5, б). Таким образом, модель – уравнение (4) – отражает влияние релаксации внутренних напряжений, создаваемых внешними силами, на режим фрикционного скольжения.

Ранее, с помощью комплексного акустико-механического подхода, было показано, что одноосное сжатие/растяжение исследуемых образцов льда сопровождается накоплением деформационных дефектов (дислокаций и микротрещин), причём образование сетки микротрещин можно было наблюдать визуально [7]. Эти деформационные перерождения структуры вызывали изменение эффективного модуля упругости $E_{\text{эфф}}$, количественное значение которого определяли непосредственно в процессе механических испытаний (без разгрузки).

В конфузуре в условиях высокого гидростатического давления формируется структура, аналогичная структуре льда в промежуточном слое. К особенностям этой структуры относятся малый размер и округлая форма зёрен льда. Движущая сила формирования такой структуры – высокое гидростатическое давление при определённом соотношении сдвиговой и нормальной компоненты напряжений. Несомненно, что к основным пластическим механизмам в условиях

всестороннего сжатия по-прежнему относятся сдвиг по плоскостям кристаллической решётки льда, зернограничное скольжение и перекристаллизация. Однако при высоком гидростатическом давлении и локальном повышении температуры создаётся возможность скольжения по разным плоскостям кристаллической решётки льда. Механизм сдвига по базисной плоскости перестаёт быть определяющим. В результате изменяются макроскопические деформационные и прочностные характеристики льда.

Время релаксации определяющих механизмов деформации и разрушения льда становится ключевым фактором в его механическом поведении. Так, блоковый механизм скольжения льда (см. рис. 5, б) есть результат действия остаточных напряжений, которые создаются во льду силами, направленными вдоль оси и по образующим цилиндрической матрицы. Завершённость данного процесса зависит от скорости скольжения льда и амплитуды этих сил, включая соотношение внутреннего и внешнего трения. Если процесс релаксации не завершён к моменту выхода из патрубка, то струя льда приобретает под действием остаточных напряжений «геликоидальную» форму (см. рис. 5, б), если завершён, то струя льда сохраняет «гладкую» форму (см. рис. 5, а).

С помощью матрицы сложной формы с гладкими стенками реализован процесс интенсивной пластической деформации пресноводного льда. Получены макрообразцы льда с мелкокристаллической структурой, которую ранее удавалось наблюдать только в тонком промежуточном слое, например на подложке с препятствием [14]. Как было показано ранее, препятствия на подложке не только существенно изменяют поле напряжений на фрикционном контакте, но и влияют на формирование структуры в прилегающем льде. Роль концентратора напряжений в новом эксперименте выполнял конфузур с гладкими стенками. Как и на фрикционном контакте, в конфузуре происходит неравновесный процесс, следствие которого – изменение структуры льда и его характеристик (пределов упругости, текучести, прочности).

Нельзя не отметить, что при переходе от трения покоя к трению скольжения в цилиндрической части матрицы наблюдаются те же самые закономерности изменения амплитудно-частотных спектров (смещение амплитудно-частотно-

го спектра и его прерывистость, типа stick-slip), которые были установлены ранее на ледниках Альдегонда (Западный Шпицберген), Центральный Тууксу и Молодёжный (Северный Тянь-Шань) [6]. При прочих равных условиях изменение режима движения льда определяется соотношением сдвиговых и нормальных компонент напряжений. Эти факты могут быть полезны для изучения локальных подвижек ледников.

Кинетика процесса рекристаллизации льда в конфузоре («переход» исходной структуры льда диаметром 3 мм к новой равновесной структуре диаметром 0,3 мм) отражена в акустических спектрах сигналов (см. рис. 6). Для их интерпретации применена цепочечная модель, отражающая фундаментальное свойство материи – дискретность её строения. Полученное согласие теоретического расчёта с экспериментом открывает возможность дистанционного изучения микро- и макро-механики контактного разрушения льда.

Заключение

В предшествующих исследованиях представления о физике и механике движения ледников основывались в основном на экспериментальных результатах, полученных при одноосных испытаниях образцов пресноводного льда малых размеров.

Применительно к проблеме движения льда в ледниках разработан акустико-механический метод физического моделирования движения ледников по ложу. Метод основан на сдвиге льда по подложке сложной формы в условиях высокого гидростатического давления. Преимущество этого метода состоит в том, что новая схема нагружения позволяет, во-первых, определять в лабораторных условиях реологические характеристики льда в максимально приближённых к реальным условиям и, во-вторых, контролировать деформационные изменения структуры в придонных слоях ледникового льда дистанционно. Главный результат выполненных исследований состоит в том, что на сухом фрикционном контакте льда с гладкой подложкой в условиях стеснения формируется промежуточный слой, реологические свойства которого принципиально отличаются от свойств исходного льда. Формирование такого слоя в ледниках может существенно влиять на режимы их движения.

Использовали аналог экструдера, матрицу с коэффициентом обжатия равным 30 и пресс-штемпелем диаметром 57 мм, который имел рабочую эллиптическую поверхность. Процесс блочного скольжения и течения льда под действием осевой силы до 300 кН последовательно наблюдали в цилиндрической секции матрицы, в конфузоре и патрубке. Максимальная скорость выдавливания ледяной струи через патрубок длиной 23 мм и диаметром 10 мм при -17°C составляет около 10 км/год. Воспроизведены основные режимы движения ледника по ложу: скольжение и течение, включая формирование промежуточного слоя. Выполнен количественный мониторинг структуры льда в промежуточном слое в процессе интенсивной пластической деформации, основанный на анализе спектров акустической эмиссии в диапазоне частот от 10 Гц до 25 кГц. Получены и исследованы макрообразцы льда со структурой, аналогичной структуре в промежуточном слое. Определён модуль пластичности, измерены коэффициенты трения на фрикционном контакте льда с сухой подложкой в условиях всестороннего сжатия.

Впервые последовательно рассмотрены режимы блокового движения льда, первоначально примороженного к стенкам цилиндрической матрицы, обжатия и перекристаллизации этого льда в конфузоре, а также его течения через выводной патрубок, включая формирование струи льда в виде прутка. Для каждой стадии определены адгезионная прочность соединения льда с подложкой и коэффициент трения льда о подложку. Установлены структура, физико-механические, прочностные и акустические характеристики льда в промежуточном слое, сформированном на пластическом фрикционном контакте с «сухой» подложкой; исследовано влияние структуры на режимы скольжения. Получены объёмные образцы пресноводного льда с ультрамелкокристаллической структурой (диаметр зёрен около 0,3 мм).

Рассмотрена эволюция структуры пресноводного поликристаллического льда в процессе интенсивной пластической деформации. Показано, что скольжение льда, первоначально примороженного к стенкам цилиндрической секции, в условиях высокого гидростатического давления приводит к образованию на фрикционном контакте промежуточного слоя малой толщины.

В процессе интенсивной пластической деформации в конфузоре и патрубке формируется структура льда макроскопических размеров (первые сантиметры) с зёрнами округлой формы диаметром 0,3 мм, которая характеризуется повышенной текучестью. Наблюдается обратная связь: условия движения льда формируют структуру, которая в свою очередь определяет режим его движения (например, скольжение в цилиндрической секции матрицы и течение льда в трубке).

Формирование вторичных объёмных структур льда при интенсивной пластической деформации обусловлено коллективным скольжением дислокаций в разных плоскостях кристаллической решётки льда, облегчённым в условиях высокого всестороннего сжатия зернограничным скольжением и процессами рекристаллизации. Это подтверждается деформационным изменением структуры льда, экспериментальной зависимостью частоты осцилляторов от их радиусов и количественным согласием цепочечной модели с экспериментом. Возникновение спиральных течений в конфузоре могут быть объяснены рядом причин (неустойчивость течения в конфузоре и трубке, анизотропия и прилипание льда), однако для понимания механизма данного эффекта требуются дальнейшие исследования.

Акустические спектры деформационного изменения структуры льда в конфузоре имеют такие же характерные особенности в виде повторяющихся импульсов (типа stick-slip), которые обнаружены в собственных спектрах акустической эмиссии в ледниках. В соответствии с этим акустико-механический метод может рассматриваться как перспективный для исследований процессов формирования структуры льда в промежуточном слое, анализа её влияния на адгезионную прочность соединения льда с подложкой, моделирования режимов движения ледников по ложу и изучения механизмов пластической деформации льда в условиях высокого гидростатического давления при сдвиге.

Благодарности. Автор признателен академику В.Ф. Журавлеву за конструктивные обсуждения и ценные замечания при обсуждении статьи. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-05-07767_a).

Acknowledgments. The author is grateful to Academician V.F. Zhuravlev for the constructive discussion and valuable comments on the original manuscript. This work was funded by the Russian Foundation of Basic Research (grant 15-05-07767_a).

Литература

1. Gow A.J., Veesse D. Physical properties, crystalline textures and c-axis fabrics of the Siple Dome (Antarctica) ice core // *Journ. of Glaciology*. 2007. V. 53. № 183. P. 573–584.
2. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф., Осокин Н.И. Физическое моделирование контакта ледника с ложем // *Лёд и Снег*. 2013. № 1 (121). С. 43–52.
3. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.
4. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
5. Епифанов В.П. Разрушение поликристаллического льда // *ДАН*. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364–1367.
6. Епифанов В.П. Применение акустических методов в исследованиях снежного покрова // *Криосфера Земли*. 2014. Т. 18. № 3. С. 101–113.
7. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // *Криосфера Земли*. 2010. Т. 14. № 4. С. 42–55.

References

1. Gow A.J., Veesse D. Physical properties, crystalline textures and c-axis fabrics of the Siple Dome (Antarctica) ice core. *Journ. of Glaciology*. 2007, 53 (83): 573–584.
2. Epifanov V.P., Glazovsky A.F., Osokin N.I. Physical modeling of glacier contact with the bed. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 1 (121): 43–52. [In Russian].
3. Valiev R.Z., Alexanderov I.V. *Nanostrukturnye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiey*. Nanostructured materials produced by severe plastic deformation. Moscow: Logos, 2000: 272 p. [In Russian].
4. Storojev M.V., Popov M.V. *Teoriya obrabotki metallov davleniem*. Theory of processing of metals by pressure. Moscow: Mashinostroenie, 1971: 424 p. [In Russian].
5. Epifanov V.P. Destruction of polycrystalline ice. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 1982, 267 (6): 1364–1367. [In Russian].
6. Epifanov V.P. The use of acoustic methods in the study of snow cover. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2014, 18 (3): 101–113. [In Russian].
7. Epifanov V.P., Glazovsky A.F. Acoustic characteristics as an indicator of the specifics of ice movement in glaciers. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2010, 14 (4): 42–55. [In Russian].

8. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Исследование ледников на основе акустических измерений // Лёд и Снег. 2013. № 3 (123). С. 12–19.
9. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций. М.: Изд-во иностр. литературы, 1963. 248 с.
10. Епифанов В.П. Механика и прочность пресного льда // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 56–64.
11. Lyyra M., Jantti M., Launiainen J. Adhesive strength of spray accreted ice on materials and coatings // Intern. Offshore and Navigation Conf. and Exhibition. ESPOO. 1986. P. 484–496.
12. Kanazawa S., Arakawa M., Maeno N. Measurement of snow and ice friction at low sliding velocities // Seppyo Journ. of the Japanese Society of Snow and Ice. 2003. V. 65. P. 389–398.
13. Meuler A.J., Smith J.D., Varanasi K.K., Mabry J.M., McKinley G.H., Cohen R.E. Relationships between water wettability and ice adhesion // Applied Materials Interfaces. American Chemical Society. 2010. V. 2. № 11. P. 3100–3110.
14. Епифанов В.П., Саватиугин Л.М. Влияние препятствий на ложе на движение ледника // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 55–66.
15. Beeman M., Durham W.B., Kirby S.H. Friction of ice // Journ. of Geophys. Research Letters. 1988. V. 93. P. 7625–7633.
16. Гамель Г. Спиралевидные движения вязкой жидкости // Нелинейная динамика / Пер. с немецкого. 2009. Т. 5. № 1. С. 111–133.
17. Епифанов В.П. Моделирование процессов рекристаллизации в придонных слоях ледников // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 3. С. 20–31.
18. Zimmerman R., Pimental G.C. The infrared spectrum of ice; temperature dependence of the hydrogen bond potential function // Advances in molecular spectroscopy. V. 2 / Ed. MacMillan. New-York: Pergamon, Oxford, 1962. P. 726–737.
8. Epifanov V.P., Glazovsky A.F. The study of glaciers based on acoustic measurements. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 3 (123): 12–19. [In Russian].
9. Eshelby J. *Kontinualnaya teoriya dislokatsiy*. The continuum theory of dislocations. Moscow: Foreign Literature, 1963: 248 p. [In Russian].
10. Epifanov V.P. Mechanics and strength of freshwater ice. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 56–64. [In Russian].
11. Lyyra M., Jantti M., Launiainen J. Adhesive strength of spray accreted ice on materials and coatings. Intern. Offshore and Navigation Conf. and Exhibition. ESPOO. 1986: 484–496.
12. Kanazawa S., Arakawa M., Maeno N. Measurement of snow and ice friction at low sliding velocities. Seppyo. Journ. of the Japanese Society of Snow and Ice. 2003, 65: 389–398.
13. Meuler A.J., Smith J.D., Varanasi K.K., Mabry J.M., McKinley G.H., Cohen R.E. Relationships between water wettability and ice adhesion. Applied Materials Interfaces. American Chemical Society. 2010, 2 (11): 3100–3110.
14. Epifanov V.P., Savatiugin L.M. Effect of obstacles on glacier movement on bedrock. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2013, 96 (2): 55–66. [In Russian].
15. Beeman M., Durham W.B., Kirby S.H. Friction of ice. Journ. of Geophys. Research Letters. 1988, 93: 7625–7633.
16. Hamel G. Spiralevidnye dvizheniya вязкой жидкости. Nelineynaya Dinamika. 2009, 5 (1): 111–133. Spiralförmige Bewegungen zäher Flüssigkeiten. Journal-Ber. Deutsch. Math. Verein. 1917, 25: 34–60. <http://mi.mathnet.ru/nd83>.
17. Epifanov V.P. Modeling of crystallization processes in the basal layers of the glaciers. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2015, 19 (3): 20–31. [In Russian].
18. Zimmerman R., Pimental G.C. The infrared spectrum of ice; temperature dependence of the hydrogen bond potential function. In: Advances in Molecular Spectroscopy. V. 2. Ed. MacMillan. N.-Y.: Pergamon, Oxford. 1962: 726–737.